

# $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 对铝合金表面激光熔覆 NiAl 涂层组织性能的影响

雷临苹, 叶宏, 宋坤, 卢秀华, 郑杰, 欧林南, 冯凯

(重庆理工大学, 重庆 430000)

**摘要:** **目的** 进一步提高 6061 铝合金表面的硬度、耐磨性。**方法** 应用脉冲 Nd:YAG 激光器在 6061 铝合金表面制备了 NiAl 合金涂层和 NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合涂层。通过 SEM、X 射线衍射仪系统研究了  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  陶瓷相添加对 NiAl 熔覆层组织形貌、成分分布、物相组成的影响。利用 HVS-1000 硬度测试仪及 HSR-2M 高速摩擦磨损机, 对熔覆层硬度分布及耐磨性进行测试分析。**结果**  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  陶瓷颗粒加入使涂层宏观成形质量明显提高, 表面平整光滑、波纹均匀, 熔覆层枝晶间距减小, 组织结构明显细化。与 NiAl 熔覆层相比, 在 NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合涂层中, 具有较高硬度的  $\text{Al}_3\text{Ni}$ 、 $\text{Al}_3\text{Ni}_2$  硬质相含量增大。同时, 高硬度  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和良好韧性的  $\text{TiO}_2$ 、NiTi 金属间化合物在复合涂层内部形成。NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合涂层的显微硬度平均可达  $650\text{HV}_{0.2}$ , 相比 NiAl 涂层提高了  $300\text{HV}_{0.2}$ ; 磨损体积仅为铝合金基体的 1/9, 相比 NiAl 涂层降低了 35%。干摩擦条件下, NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合涂层的犁削、剥落现象显著降低。**结论** 在细晶强化、硬质相弥散强化及良好韧性的 NiTi 金属间化合物共同作用下, 6061 铝合金表面硬度和耐磨性得到显著提高。

**关键词:** 铝合金; 激光熔覆; NiAl 涂层;  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ; 组织; 耐磨性

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)10-0145-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.10.019

## Effect of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ on Microstructure and Properties of NiAl Coating by Laser Cladding on Aluminum Alloy

LEI Lin-ping, YE Hong, SONG Kun, LU Xiu-hua, ZHENG Jie, OU Lin-nan, FENG Kai

(Chongqing University of Technology, Chongqing 430000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the abrasion resistance on 6061 aluminum alloy further. NiAl and NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  composite coatings were prepared on the surface of 6061 aluminum alloy by pulse Nd:YAG laser. SEM and X-ray diffraction were used to investigate the effects of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  ceramic phase on microstructure, element distribution and phase composition of NiAl coating. The hardness distribution and wear resistance of the coating were analyzed by HVS-1000 hardness tester and HSR-2M high-speed friction tester, respectively.  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  ceramic particles added to the cladding coating improved the quality of macromorphology and led to a smooth and uniform surface. The dendrite spacing decreased and the microstructure refined

收稿日期: 2018-03-23; 修订日期: 2018-08-26

**Received:** 2018-03-23; **Revised:** 2018-08-26

**基金项目:** 重庆理工大学研究生创新基金 (YCX2016240); 重庆市大学生创新创业训练计划项目 (201711660008)

**Fund:** Innovation fund of "Chongqing University of Technology" (YCX2016240), the Innovation and Entrepreneurship Developing Project for the College Students in Chongqing (201711660008)

**作者简介:** 雷临苹 (1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

**Biography:** LEI lin-ping (1992—), Female, Master, Research focus: surface engineering.

**通讯作者:** 叶宏 (1967—), 女, 硕士, 教授, 主要从事金属材料表面改性研究。邮箱: yehong@cqut.edu.cn

**Corresponding author:** YE Hong (1967—), Female, Master, Professor, Research focus: metal material surface modification. E-mail: yehong@cqut.edu.cn

obviously. Compared with NiAl cladding coating, the amount of  $\text{Al}_3\text{Ni}$  and  $\text{Al}_3\text{Ni}_2$  with higher hardness in NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  composite coating increased. Meanwhile, the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reinforced phase and  $\text{TiO}_2$  and NiTi with better toughness were formed in the composite coating. The average microhardness of NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  composite coating was about  $650\text{HV}_{0.2}$ , which was  $300\text{HV}_{0.2}$  higher than that of NiAl coating and the wear volume was only 1/9 to matrix, which was 35% lower than that of NiAl coating. Under the condition of dry friction, the plowing and peeling of NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  composite coating decreased significantly. With the combination effect of the grain refinements, dispersion strengthening and better toughness of the NiTi intermetallic compounds, the microhardness and abrasion resistance of 6061 aluminum alloy significantly improve.

**KEY WORDS:** aluminum alloy; laser cladding; NiAl coating;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$ ; microstructure; abrasion resistances

21 世纪以来,随着环境污染和能源危机日益突出,新时代对节能、环保、安全提出了新要求。铝合金以其自身优势成为新时代汽车轻量化研究和开发的关键材料<sup>[1]</sup>。目前,铝合金正被广泛应用于汽车车身、轮毂、热交换器、保险杠、机器盖板发动机活塞环等汽车部件,以实现零部件的轻量化、刚性化<sup>[2-3]</sup>。然而,化学性质活泼、表面硬度低、耐磨性差以及使用时易产生塑性变形,在很大程度上限制了铝合金在一些重要摩擦零部件上的应用,制约了其进一步的应用和发展<sup>[4-5]</sup>。

随着激光熔覆技术的进一步发展,陶瓷颗粒增强金属基复合涂层以高耐磨、高强度、良好韧性等优异性能,成为激光熔覆涂层研究开发的热点<sup>[6]</sup>。一定陶瓷相颗粒( $\text{TiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiC}$ 、 $\text{TiB}_2$ 、 $\text{WC}$ 、 $\text{SiC}$ 等)的添加,对于涂层组织的细化及硬度、耐磨性提高具有明显效果<sup>[7-10]</sup>。Mabhalli LAB 等<sup>[11]</sup>研究了 AA1200 铝合金表面激光熔覆 Ni/Ti/SiC 复合涂层,在多种金属间化合物的强化作用下,基体的耐磨性得到了有效的改善。周笑微等<sup>[12]</sup>应用激光熔覆技术在 A3 钢表面制备了 Ni60 合金添加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层。结果显示,相比 Ni60 熔覆层,添加 0.5% $\text{Al}_2\text{O}_3$  的熔覆层硬度提高了  $300\text{HV}_{0.3}$ ,耐磨性提高了 4 倍,可见  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的添加对于熔覆层性能的改善具有显著作用。金属间化合物是介于陶瓷与金属之间的一种材料,相对于金属是脆性材料,而相对陶瓷则具有一定塑性。本文通过将 Ni/Al 及  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  陶瓷粉末复合应用于 6061 铝合金表面激光熔覆涂层的制备,以期制得兼有金属和陶瓷双向优点的耐磨涂层。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

选用 6061 铝合金作为研究对象,其化学成分(质量分数计)为:0.8%~1.2%Mg, 0.4%~0.8%Si, 0.7%Fe, 0.15%~0.4%Cu, 0.15%Mn, 0.25%Zn, 0.04%~0.35%Cr, 0.15%Ti, 0.15%Zr, Al 余量。基体表面使用 240#砂纸打磨,而后用 8% (体积分数) HCl 酸洗、丙酮擦洗,以去除氧化物膜、污垢等杂质。NiAl 涂层熔覆材料为 50%纯 Al 粉+50%雾化 Ni 粉,其中 Al 粉纯

度>99.9%,粒度 100~200 目;雾化 Ni 粉粒度为-150~+300 目。在 NiAl 涂层熔覆材料基础上,加入质量分数 10%的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  陶瓷粉末( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  分别占陶瓷粉总质量的 60%、40%),粉末熔点 1840 °C 左右,粒度 150~300 目,获得 NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  金属陶瓷复合涂层熔覆材料。

### 1.2 试验方法

用 0.3% (质量分数) 的聚乙烯醇做粘结剂,将混合粉末调制成膏状,平铺在预处理材料表面,厚度为 0.8 mm。采用 JHM-1GXY-800B 型 Nd:YAG 激光器对预制涂层进行激光熔覆处理,试验前期的优化工艺参数:电流 210 A,扫描速度 250 mm/min,脉宽 4.0 ms,频率 8.0 Hz,光斑直径 2 mm,氩气流量 15 L/min,搭接率 35%。

将熔覆层沿垂直于激光扫描方向切开。依次采用 240#—1200#SiC 砂纸打磨、抛光。采用 Keller 试剂(95 mL  $\text{H}_2\text{O}$ +2.5 mL  $\text{HNO}_3$ +1.5 mL  $\text{HCl}$ +1.0 mL  $\text{HF}$ )对金相试样进行腐蚀。使用 JSM-6460LV 型扫描电镜及其附带能谱观察分析微观组织形貌及化学元素分布。采用 Empyrean 锐影 X 射线衍射仪进行物相分析。通过 HVS-1000 型显微硬度计测试涂层硬度,加载载荷 200 g,保压时间 15 s。使用 HSR-2M 高速摩擦磨损试验机进行磨损试验,GCr15 钢珠作为摩擦副,加载载荷 20 N,磨损长度 10 mm,转速 400 r/min,磨损时间 15 min。使用 NanoMap500LS 表面轮廓仪测量磨损截面积,截面积乘以磨痕宽度即为磨损体积。利用扫描电镜观察磨损形貌,研究磨损机理。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 熔覆层形貌

激光熔覆层的形貌如图 1 所示。由图 1 可知,NiAl 熔覆层表面(图 1a)较粗糙,存在大面积团聚现象,成形质量较差,在熔覆层内部(图 1b)有明显的裂纹产生,且熔覆层厚度不均匀。NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  复合涂层(图 1c、d)表面相对平整光滑、波纹均匀,并未出现 NiAl 熔覆层团状熔凝组织,且熔覆层厚度均匀,无明显裂纹形成,与基体呈良好的冶金

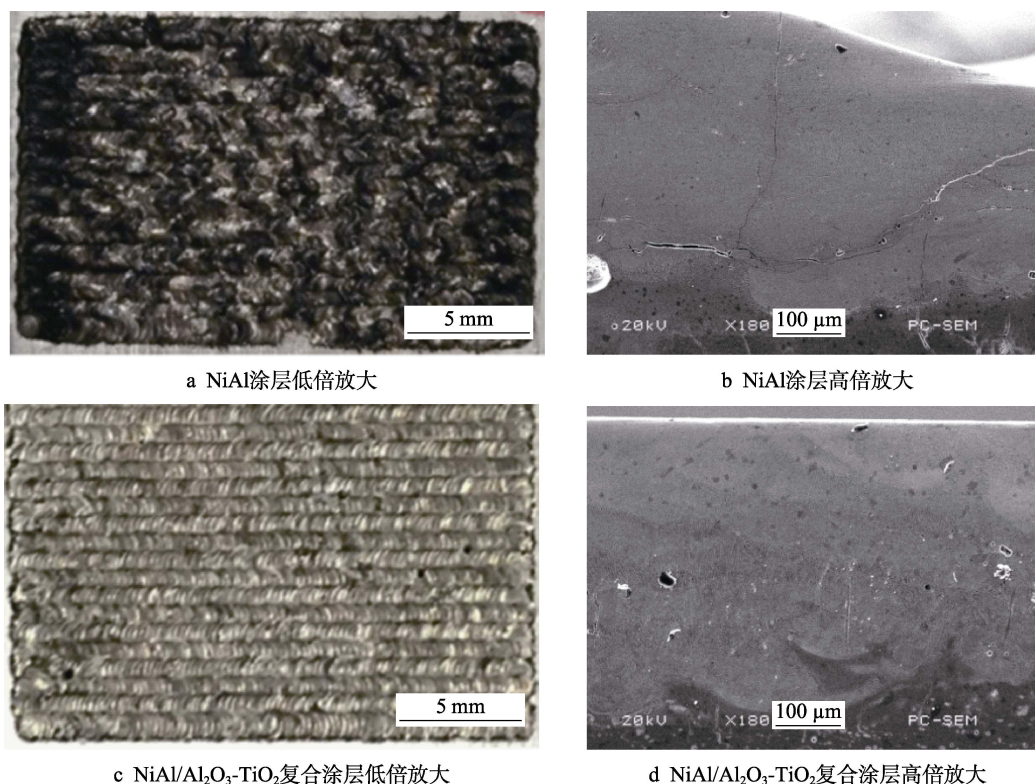


图 1 熔覆层形貌

Fig.1 Macrographs of cladding coatings: a) the surface morphology of NiAl coating; b) the cross-section morphology of NiAl coating; c) the surface morphology of NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  composite coating; d) the cross-section morphology of NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  composite coating

结合。造成这种现象的原因在于：铝合金熔点低、密度小，在高能量密度激光束作用下，熔池内部极易产生熔体对流现象，导致铝液上浮，表面极易烧损，致使熔覆层表面塌陷；而添加  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合陶瓷将会在涂层内部形成钉扎和弥散作用，进一步抑制涂层组织生长过程中“穿晶”现象的发生，从而降低熔覆层的开裂敏感性，改善熔覆层的成形质量<sup>[13]</sup>。

## 2.2 物相及微观组织形貌分析

图 2 为激光熔覆层 XRD 图谱。NiAl 涂层主要由  $\alpha\text{-Al}$  固溶体和  $\text{AlNi}$  相组成，同时含有少量  $\text{Al}_3\text{Ni}$ 、 $\text{Al}_3\text{Ni}_2$  金属间化合物。添加  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  陶瓷相颗粒后，

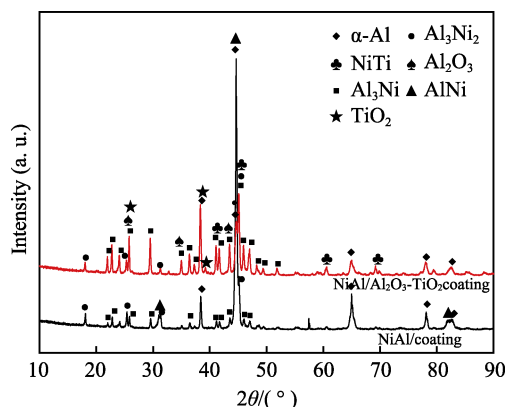


图 2 涂层 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of coating

$\alpha\text{-Al}$  固溶体和  $\text{AlNi}$  金属间化合物的衍射峰强度降低，具有较高硬度<sup>[14]</sup>的  $\text{Al}_3\text{Ni}$ 、 $\text{Al}_3\text{Ni}_2$  衍射峰强度明显提高，同时生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{NiTi}$ 、 $\text{TiO}_2$  三种新相。 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合陶瓷在高能量激光作用下发生溶解，在随后的冷却结晶过程中， $\text{Al}$ 、 $\text{O}$ 、 $\text{Ti}$  重新结晶形成  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  颗粒，少量  $\text{Ti}$  与熔池中的  $\text{Ni}$  元素结合形成  $\text{NiTi}$  金属间化合物。同时， $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  陶瓷颗粒熔化导致熔池中的铝含量增加，促使  $\text{Al}_3\text{Ni}$ 、 $\text{Al}_3\text{Ni}_2$  富铝相金属间化合物含量升高。

图 3 为 NiAl 和 NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合涂层的典型组织形貌。通过对比图 3a、c 两种涂层表层形貌可见， $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合陶瓷的添加使熔覆层组织形貌发生了明显的变化，主要表现为 NiAl 涂层的典型柱状树枝晶组织消失，涂层呈现致密细小的胞状树枝晶排列，胞状树枝晶一次晶主干较发达，枝晶间距减小，数量增多，组织结构明显细化。同时，涂层中存在大量细小的白色颗粒相弥散镶嵌于枝晶间隙，为异质形核提供了现成的表面。 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合陶瓷的加入，导致枝晶界前沿出现更大的过冷度，促进液态金属大面积同时形核<sup>[15-16]</sup>。高温下其分离出的  $\text{Al}$ 、 $\text{Ti}$ 、 $\text{O}$  元素和熔池中  $\text{Al}$ 、 $\text{Ni}$  元素重新结合形成新的化合物，作为异质形核的核心，使熔池中形核质点数量增加，枝晶生长受到限制，组织得到明显细化，从而改善涂层致密性，为涂层耐磨性的提高奠定了一定基础。图 3b、d 为两种涂层底部的组织形貌，对比分析可发现，

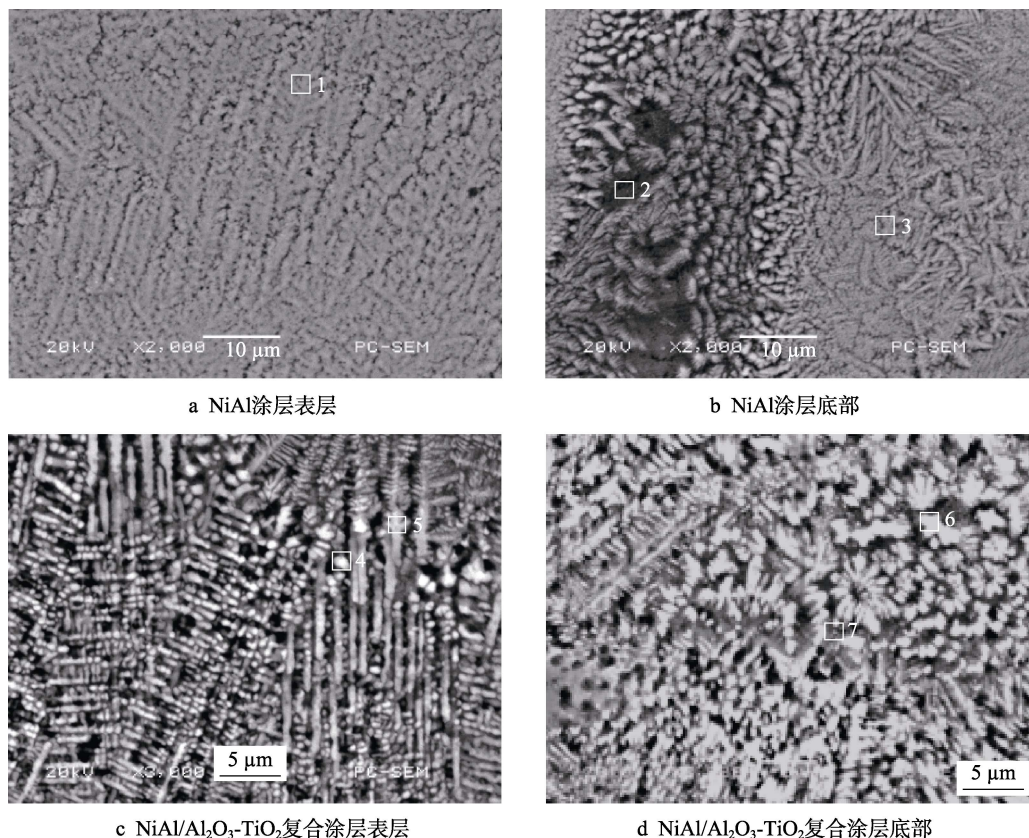


图3 激光熔覆层典型组织形貌

Fig.3 Typical microstructure of the laser cladding coating: a) The surface microstructure of NiAl coating; b) The bottom surface microstructure of NiAl coating; c) The surface microstructure of composite coating; d) The bottom surface microstructure of NiAl/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> composite coating

NiAl 涂层存在明显的组织不均匀现象,呈现出粗大树枝晶及生长方向紊乱的棒状组织两种不同形貌。受熔池内部温度梯度和固液界面前沿溶质非平衡分配规律的综合影响,导致涂层最终的凝固组织呈现出明显的不均匀分布。在 NiAl/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合涂层中,整个区域均以花瓣状枝晶、少量树枝晶组织交替组成,整体均匀性较好。这是因为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合陶瓷的添加,提高了熔池熔体的流动性,使组织分布更加均匀。

为进一步研究 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合陶瓷添加对 NiAl 涂层元素分布的影响,对图 2 不同区域进行 EDS 能谱分析,结果见表 1。在 NiAl 涂层表层柱状晶位置(点 1),Al 与 Ni 的原子百分比接近 3:2,结合 XRD 物相分析可推测,表层柱状晶主要由 Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> 相组成。底部由于铝合金基体的稀释作用,加之激光熔覆快热快冷的特征,使先结晶枝干和后结晶枝间元素含量存在较大差异,底部枝晶间隙(点 2)的 Al 含量高达 94.33%,Ni 仅为 5.62%,而与其相邻区域(点 3)的 Al:Ni 原子百分比接近 3:1,结合物相分析可知,在 2、3 点位置分别形成 α-Al 固溶体和 Al<sub>3</sub>Ni 相。NiAl/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合涂层由表层至底部,元素含量分布基本均匀,表层镶嵌在枝晶间隙的细小白色颗粒(点 4)和枝干(点 5)间主要表现为 Al、Ti 两种元素含量的微量起伏,结合 XRD 分析,推测白色颗粒可能为

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合陶瓷在高能激光束下分解后重新结晶形成的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 或 TiO<sub>2</sub> 硬质相颗粒。底部暗灰色区域(点 7)的 O 元素约为白色区域(点 6)的 2 倍,而 Ni 元素含量仅有 9.82%,可见在底部灰色区域,Al 元素主要以 α-Al 固溶体和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 硬质相颗粒存在,晶粒表层白色区域以 Ni-Al 金属间化合物为主。

表 1 图 3 不同位置元素分布

Tab.1 Element composition at different positions in Fig.3 at%

	Point	Position	Al	Ni	O	Ti
NiAl Coating	1	Top	60.99	29.01		
	2	Bottom	94.25	5.62		
	3		72.29	27.5		
NiAl/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub> composite coating	4	Top	74.44	15.49	9.68	0.39
	5		76.18	16.39	7.2	0.23
	6	Bottom	68.07	26.74	5.04	0.14
	7		79.17	9.82	10.85	0.16

## 2.3 显微硬度

熔覆层截面硬度分布曲线如图 4 所示。NiAl 涂层的平均硬度约为 350HV<sub>0.2</sub>, NiAl/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 复合涂层的平均硬度约为 650HV<sub>0.2</sub>, 添加 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 陶瓷粉

末涂层的显微硬度比 NiAl 涂层的平均提高  $300\text{HV}_{0.2}$ 。造成这种现象的原因是: 在组织形核及长大过程中, 高熔点  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $2050\text{ }^\circ\text{C}$ )、 $\text{TiO}_2$  ( $1850\text{ }^\circ\text{C}$ ) 陶瓷颗粒在熔池内部优先结晶析出, 从而使熔池中的形核质点数量增多, 增大组织形核率, 使熔池内部枝晶生长受到限制, 起到细晶强化作用; 同时, 涂层内部弥散分布的细小硬质相化合物可以钉扎位错和亚晶界运动, 起到第二相强化作用, 在细晶强化、弥散强化等多种强化机制共同作用下, 涂层硬度得到显著提高。

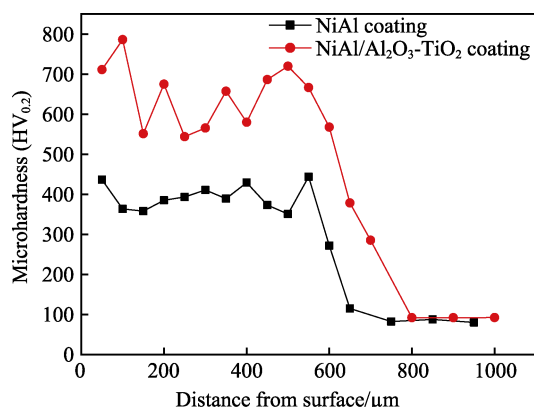


图 4 熔覆层硬度曲线分布

Fig.4 Hardness profile of cladding coatings

## 2.4 耐磨性

图 5 为熔覆层磨损体积。由图 5 可知, NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合涂层的磨损体积仅为铝合金基体的  $1/9$ , 相比 NiAl 涂层降低了 35%, 耐磨性显著提高。熔覆层表面磨损形貌及摩擦系数如图 6 所示。由图 6a、b 可见, 在长时间加载磨损作用下, NiAl 涂层磨损表面粗糙, 伴有大面积剥落、脱层现象, 表现为典型疲劳磨损特征。NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合涂层磨损表面相对光滑, 犁削作用较弱, 仅存在轻微划痕, 局部存在少量凹坑, 磨损机制以磨粒磨损为主, 并伴随少量粘着磨损。根据图 6c 摩擦系数曲线可知, NiAl 涂层在起始阶段 (前 4 min), 摩擦系数有明显的浮动, 后随着磨

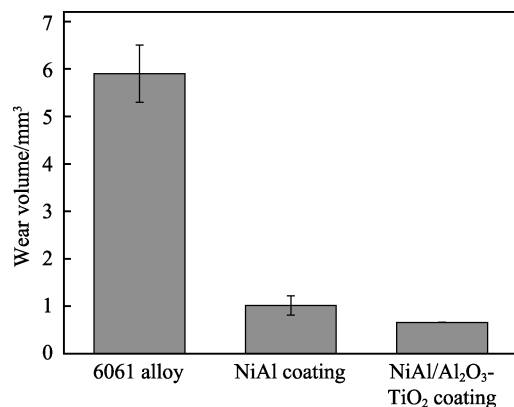
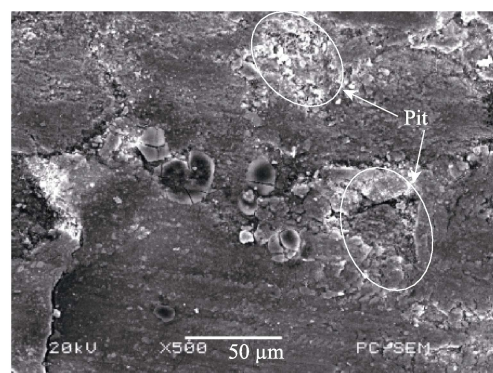


图 5 熔覆层磨损体积

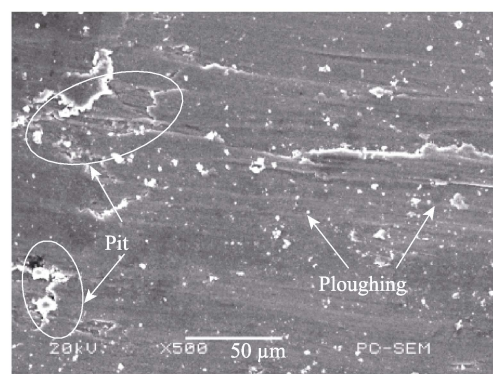
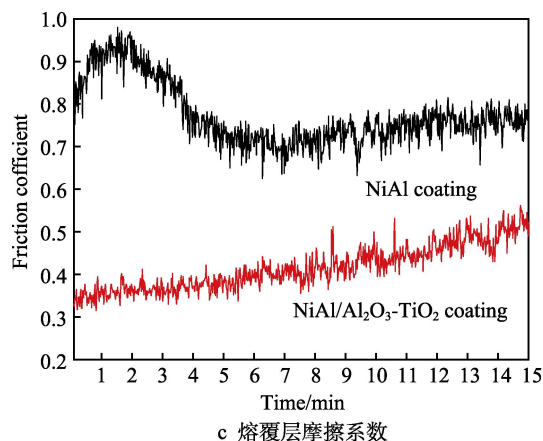
Fig.5 The wear volume of cladding coatings

损过程的进行而显著降低且趋于稳定。随磨损过程的进行, NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合涂层磨损面与对磨球之间趋于磨合状态, 局部产生粘着现象 (图 6b), 犁削力和粘着力共同组成摩擦力, 导致 NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合涂层随时间的延长, 摩擦系数有所增大。NiAl 涂层和 NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合涂层的平均摩擦系数分别为 0.773、0.415。

NiAl 涂层主要由  $\alpha\text{-Al}$  及 NiAl 脆性金属间化合物相组成, NiAl 脆性相在连续外加接触应力的作用下极易破碎, 并从涂层组织中剥落、流失, 导致表面形成严重剥落、脱层现象。NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  复合涂层组



a NiAl涂层磨损形貌

b NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 复合涂层磨损形貌

c 熔覆层摩擦系数

图 6 熔覆层磨损形貌及摩擦系数

Fig.6 The worn morphologies and friction coefficient of cladding coatings: a) the worn morphology of the NiAl coating; b) the worn morphology of the NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  composite coating; c) the friction coefficient of cladding coating

织中弥散分布的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  陶瓷相颗粒, 在摩擦磨损过程中可有效阻碍基体塑性变形, 起到一定的支撑和承载作用, 可改变摩擦副和涂层之间的接触特性, 从而降低犁削和粘着作用, 提高涂层的耐磨性<sup>[17]</sup>。此外, 在摩擦过程中, 作用于硬质相的力通过转移而分布于具有良好韧性的  $\text{TiO}_2$  陶瓷相和超弹性的 NiTi 金属间化合物上, 之后熔覆层经过塑性变形将应力释放, 而自身不发生脆性断裂, 耐磨性得到显著改善。

### 3 结论

1)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  复合陶瓷的添加, 使粗大柱状枝晶组织消失, 呈现出细小、致密的胞状树枝晶, 涂层中存在大量细小的白色颗粒相弥散镶嵌于枝晶间隙。

2) NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  复合涂层主要由金属间化合物 ( $\text{Al}_3\text{Ni}$  和  $\text{Al}_3\text{Ni}_2$ )、 $\alpha$ -Al 固溶体、少量  $\text{Al}_2\text{O}_3$  硬质相及韧性相 (NiTi 和  $\text{TiO}_2$ ) 组成。

3) 在细晶强化、弥散强化多种强化机制的共同作用下, NiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  复合涂层的显微硬度比 NiAl 涂层平均提高了  $300\text{HV}_{0.2}$ , 磨损体积降低了 35%。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  陶瓷颗粒的添加对于 6061 铝合金耐磨性的提高具有重要作用。

### 参考文献:

- [1] 邢亚哲, 王强, 李文鹏, 等. 等离子喷涂灰铸铁涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 90-96.  
XING Ya-zhe, WANG Qiang, LI Wen-peng, et al. Research progress of gray cast iron coating prepared by plasma spraying[J]. Surface technology, 2016, 45(2): 90-96.
- [2] 李龙, 夏承东, 宋友宝, 等. 铝合金在新能源汽车工业的应用现状及展望[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(9): 18-25.  
LI Long, XIA Cheng-dong, SONG You-bao, et al. Application status and outlook of aluminum alloys in new energy vehicles[J]. Light alloy fabrication technology, 2017, 45(9): 18-25.
- [3] 郑晖, 赵曦雅. 汽车轻量化及铝合金在现代汽车生产中的应用[J]. 锻压技术, 2016, 41(2): 1-5.  
ZHENG Hui, ZHAO Xi-ya. Lightweight automobile and application of aluminum alloys in modern automobile production[J]. Forging & stamping technology, 2016, 41(2): 1-5.
- [4] 何龙, 王小龙, 谭华, 等. 铝合金表面激光熔覆强化涂层组织与性能研究现状[J]. 热加工工艺, 2016, 45(2): 28-33.  
HE Long, WANG Xiao-long, TAN Hua, et al. Research status in microstructure and property of laser cladding coatings on aluminum alloys surface[J]. Hot working, 2016, 45(2): 28-33.
- [5] TAN Ye-fa, HE Long, WANG Xiao-long, et al. Tribological properties of laser surface cladding Ni-base alloy coatings under dry friction and seawater conditions [J]. Surface science and engineering, 2016, 10(2): 147-161.
- [6] 刘伟, 谭禧, 曹腊梅. Si(B)CN 陶瓷及其复合材料评价与应用研究现状[J]. 装备环境工程, 2016, 13(3): 98-104.
- [7] LIU Wei, TAN Xi, CAO La-mei. Research progress in the evaluation and application of Si(B)CN ceramics and ceramic matrix composites[J]. Equipment environmental engineering, 2016, 13(3): 98-104.
- [8] CAI Y C, LUO Z, FENG M N, et al. The effect of TiC/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  composite ceramic reinforcement on tribological behavior of laser cladding Ni60 alloys coatings[J]. Surface & coatings technology, 2016, 291: 222-229.
- [9] 徐婷, 李华兵, 洪翔, 等. 激光熔覆  $\text{TiB}_2$  颗粒增强镍基复合涂层的微观组织与摩擦学性能研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(8): 1497-1509.  
XU Ting, LI Hua-bing, HONG Xiang, et al. Microstructure and tribological properties of laser cladding  $\text{TiB}_2$ /Ni-based alloy composite coatings[J]. ACTA armamentarii, 2016, 37(8): 1497-1509.
- [10] FERNANDEZ M R, GARCIA A, CUETOS J M, et al. Effect of actual WC content on the reciprocating wear of a laser cladding NiCrBSi alloy reinforced with WC[J]. Wear, 2015, 324-325: 80-89.
- [11] 赵龙志, 刘武, 刘德佳, 等. SiC 含量对激光熔覆 SiC/Ni60A 复合涂层显微组织和耐磨性能的影响[J]. 材料工程, 2017, 45(3): 88-94.  
ZHAO Long-zhi, LIU Wu, LIU De-jia, et al. Effect of SiC content on microstructure and wear resistance of laser cladding SiC/Ni60A composite coating[J]. Journal of materials engineering, 2017, 45(3): 88-94.
- [12] MABHALI L A B, SACKS N, PITYANA S. Three body abrasion of laser surface alloyed aluminum AA1200[J]. Wear, 2012, 290-291: 1-9.
- [13] 周笑薇, 晁明举, 杨坤.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  对 Ni60 激光熔覆层组织和耐磨性的影响[J]. 激光, 2006, 27(5): 81-83.  
ZHOU Xiao-wei, CHAO Ming-ju, YANG Kun. Effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on the microstructure and wear properties of laser-clad Ni60 alloy coating[J]. Laser, 2006, 27(5): 81-83.
- [14] 陈志坤, 刘敏, 曾德长, 等. 激光熔覆裂纹的产生原因及消除方法探究[J]. 激光, 2009, 30(1): 55-57.  
CHEN Zhi-kun, LIU Min, ZENG De-chang, et al. Research on formation causes and elimination methods of the laser cladding cracks[J]. Laser, 2009, 30(1): 55-57.
- [15] SHI D M, WEN B, RODERICK M, et al. First-principles studies of Al-Ni intermetallic compounds[J]. Journal of solid state chemistry, 2009, 182: 2664-2669.
- [16] 李明喜, 何宜柱, 孙国雄. 纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Ni 基合金复合材料激光熔覆层组织[J]. 中国激光, 2004, 39(9): 1149-1152.  
LI Ming-xi, HE Yi-zhu, SUN Guo-xiong.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanocrystalline/Ni-based alloy composite coatings produced by laser cladding[J]. Chinese journal of lasers, 2004, 39(9): 1149-1152.
- [17] WANG H Y, ZUO D W, SUN Y L, et al. Microstructure of nanometer  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dispersion strengthened Ni-based high-temperature protective coatings by laser cladding[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2009, 19: 586-591.
- [18] TAN H, LUO Z, LI Y, et al. Effect of strengthening particles on the dry sliding wear behavior of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{M}_7\text{C}_3$ /Fe metal matrix composite coatings produced by laser cladding[J]. Wear, 2015, 586: 36-44.